

발전 이론에 근거한 유도결합형 방전광원의 안정기 설계에 관한 연구

논 문

58-6-9

A Study on the Ballast Design of a Inductively Coupled Plasma Light Source based on Oscillation Theory

김철진* · 임연찬†
(Cherl-Jin Kim · Youn-Chan Yim)

Abstract - We studied on the design of electrical parameters for ICP(Inductively Coupled Plasma) light sources which can be effective to improve the electrical power efficiency of it. These parameters were derivated from Barkhausen theory about the oscillating condition of a ballaster. The relationships of $f-I_p$ and $f-n$ were calculated theoretically and then these relationships were compared with the measured results about I_p and power depending to a discharge length(l) of ICP light source. Finally, we can see that a specific range of induced current depending to a discharge length would be necessary to minimize the change of magnetization inductance and driving frequency at driving.

Key Words : Discharge length, Barkhausen criterion, Inductively coupled plasma, Half-bridge, coil turns

1. 서 론

1746년 Musschenbröck에 의해 처음으로 방전(discharge)의 개념이 소개된 이후 Geissler, Hittorf, J. J. Thomson과 Townsend 등의 과학자들은 방전의 기초 현상을 양자역학과 열역학적 이해를 통해 기틀을 확립하였다[1-5]. 1920년대에 들면서 수은과 회가스의 혼합기체를 이용한 저압방전에서 253.7nm의 수은 방사선을 획득할 수 있게 되었고 이를 통한 고효율 방사 가능성이 보고되었다. 즉 양광주(Positive Glow Discharge)에 인가되는 전체 전기에너지의 약 60%가 253.7nm의 자외선으로 변환되는 현상의 발견은 그 후 장수명 열음극 개발, 고효율 형광체의 개발 등으로 이어지게 되어 고효율 방전광원의 개발이 빠른 속도로 진행되어 왔다[6-10]. 그러나 초기의 방전광원 개발 산업은 산업의 중요 영역에서 제외되어 왔으나 20세기 후반에는 디스플레이 기술이 크게 발전하면서 산업의 중요한 부분으로 자리 잡게 되었다. 이로써 가스 방전을 이용한 기술은 가정의 TV, 조명용 제품들을 비롯하여 방전기술, 핵 융합기술, 폐기물 처리, 레이저 등 일반 가정용 제품에서 첨단 산업기술 분야에 이르기까지 폭넓게 적용되면서 고부가가치 산업으로 각광을 받게 되었다[11-13]. 이후 21세기에 이르러 에너지 고갈에 대한 대응과 환경 친화적인 기술 개발에 대한 요구의 증가로 산업의 패러다임이 변화하고 있다. 이러한 산업 환경의 변화에 따라 광원의 기술 개발에도 수은을 포함한 종래의 형광등을 대체하고자 고효율의 무수은 발광 기술개발이 진

행되는 등 사회적 요구에 부합되기 위한 기술적 변화가 진행되고 있다.

최근 이와 같은 기술 동향에 잘 부합되고 미래형 광원으로 발전하기 위한 연구가 유도결합형 플라즈마(Inductively Coupled Plasma) 광원을 중심으로 이루어지고 있다[6,14,15]. 유도결합형 플라즈마 광원의 경우 페라이트 코어의 특성 변화가 광원의 성능에 큰 영향을 미치며, 주된 요인으로는 페라이트 코어의 온도에 대한 의존성을 들 수 있다.[4] 이때 발생하는 주울열은 주로 전기에너지가 광학적 에너지로 변환될 때 나타나는 전력손실에 해당된다. 이에 대한 유도결합형 플라즈마 광원을 전기회로적 모델로서 표현할 경우, 방전관의 길이는 저항체로서 해석된다. 그러나 저항으로서 모델화 될 수 있는 방전관의 길이 변화는 주울열 발생에 크게 기여하면서 페라이트 코어의 특성을 변화시키는 주요 요인이 된다. 결과적으로 페라이트 코어의 특성 변화는 유도 코일의 2차 전류량을 제한하게 되어 유도결합형 플라즈마 광원의 전력손실을 증가하게 된다.

따라서 안정기의 발전조건에 부합되는 광원의 길이 선정은 안정적인 광원의 구동과 특성 유지를 위해 보다 명확히 해석되어야 할 부분으로 대두되고 있다.

본 연구에서는 임의의 특정한 자화인덕턴스 값을 갖는 페라이트 코어를 사용한 유도결합형 플라즈마 광원을 바탕으로 바크하우젠(Barkhausen) 발전조건을 적용하여 코일의 권선수와 구동주파수 대역을 결정하였다.[16] 코일의 권선수는 제작된 시료 광원 중에서 하나의 시료에 각각의 코일을 적용한 상황에서 그때 측정된 광원의 휘도특성이 가장 우수한 조건을 선택하였다. 바크하우젠(Barkhausen) 발전조건에서 추론된 피크 전류값과 측정된 피크 전류값의 비교를 통해 발전조건에 부합되는 적합한 발광관 길이를 확인하였다.

† 교신저자, 정회원 : 한국생산기술연구원, 연구원

E-mail : yimychan@kitech.re.kr

* 정 회원 : 한라대학교 전기전자제어공학부 교수

접수일자 : 2008년 9월 9일

최종완료 : 2009년 5월 11일

2. 유도결합형 플라즈마 광원

유도결합형 플라즈마 광원을 그림 1에 나타내었다.

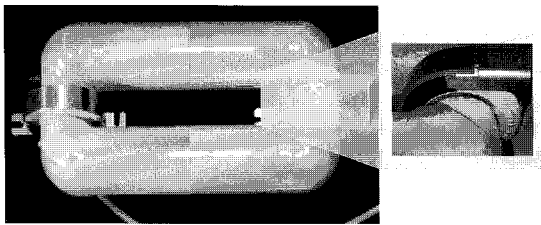
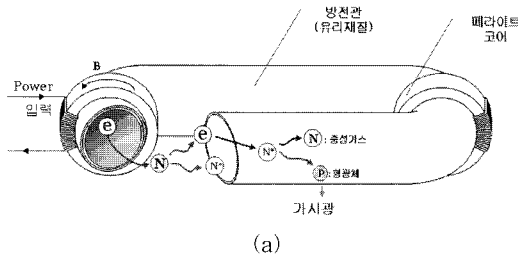


그림 1 유도결합형 플라즈마 광원 구조(a)와 실제 사진(b)
 Fig. 1 Structure(a) and real picture(b) of Inductively Coupled Plasma light sources

램프의 바깥부분에 위치해 있는 솔레노이드형 유도 코일에 고주파(RF) 전류가 공급되면 고투자율 특성을 갖는 페라이트의 형상을 따라 자기장이 형성된다. 그래서 자기장의 시간에 대한 변화는 유도 기전력을 만들게 되고 유도된 기전력에 의하여 방전광원 내부의 전자는 가속된다. 방전광원의 내부에서 가속된 전자는 중성입자와 충돌하게 되고 충돌과정에서 방출되는 에너지는 광원의 관벽에 도포되어 있는 형광물체에 흡수된다. 에너지를 흡수한 형광물체는 여기상태(excited state)로 에너지 준위가 상승한 후 다시 안정된 기저상태(ground state)로 되돌아온다. 기저상태로 되돌아가는 과정에서 에너지를 방출하며, 이 때 방출되는 에너지가 인간의 시각으로 감지할 수 있는 가시광이 된다. 전자의 가속에서 형광체 발광까지의 과정은 일반적인 기체방전의 기본원리와 동일하다.

본 연구에서 사용된 유도결합형 플라즈마 광원의 구조는 발광관(bulb), 유도 코일, 2개의 페라이트 및 페라이트 고정대로 구성되어 있다. 광원은 초기의 직관형 유리관 내부에 형광물체를 도포한 후 'ㄷ'자 모양으로 구부러 접합한다. 발광관은 초기에 10^{-6} Torr 이상의 베이스(base) 압력을 이루게 되며, 배기과정이 완료된 이후 내부 불순물 제거를 위해 열처리를 시행하였다. 열처리 과정이후 MFC(mass flow controller)를 이용하여 가스 주입구(injection tip)을 통해 0.25 Torr의 크립톤(Krypton, 순도 99.95%) 가스를 주입하였고, 사용된 페라이트 코어는 상대 투자율 1500, 자화인덕턴스 500 uH를 갖는 연자성 재질을 사용하였다. 이와 같은 동일한 과정을 통해 종방향 길이(L)는 430, 510, 705, 900 mm에 대해 횡방향 길이는 모두 동일하게 70 mm를 갖는 각각의 실험용 광원을 준비하였으며, 이 때의 관 직경(58

mm)도 모두 동일하게 제작되었다. 유도결합형 플라즈마 광원은 발광 시 회로적으로 폐루프(closed loop) 형태를 구성하면서 발광관 전체적으로 발광이 시작되는데, 이때 발광되는 전체 광량의 99% 이상은 발광관의 종방향에서 방출되고 나머지는 횡방향에서 방출된다. 횡방향의 광량이 미흡한 이유는 생성된 광자(Photon)의 열적 에너지 손실과 더불어 발광관을 덮고 있는 페라이트 코어에 의해 빛의 방출이 차단되기 때문인 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 전체 광량에 크게 기여되고 있는 종방향 성분의 발광관 길이에 대한 전기적 상호 의존성을 분석하여 보았다.

3. 안정기 설계

3.1 안정기 설계 조건

그림 2는 두 개의 스위칭 소자에 의해 에너지를 전달하는 비대칭 하프브리지 방식의 공진회로(LCC)의 구성을 나타낸 그림이다.

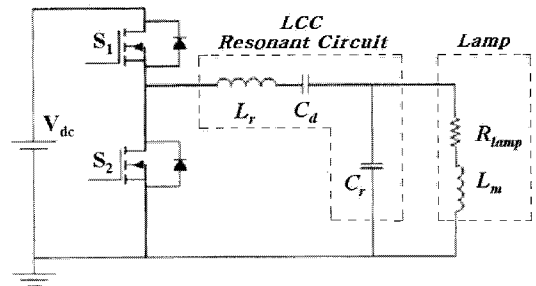


그림 2 비대칭 하프브리지 방식의 구동회로
 Fig. 2 Schematic diagram of asynchronous half-bridge driving circuit

이 구동방식은 소자수가 적고 회로구성이 간단하여 유도결합형 플라즈마 광원의 구동에 적합한 장점을 갖는다.

자려발진을 고려한 그림 2와 같은 비대칭 하프브리지 방식의 인버터에서, 공진회로부, 게이트 구동부 및 인버터 스위치 회로의 전달특성을 각각 $G(s)$, $H(s)$ 및 $I(s)$ 라 하면, 피드백 시스템이 단일 루프게인을 이루고 식(1)의 조건을 만족할 때 Barkhausen 발진이론에 의한 안정기의 발진이 가능하다.[17]

$$|G(s) \cdot H(s) \cdot I(s)_{s=j\omega}| = 1 < 2\kappa\pi \quad (1)$$

여기서, 단일 루프게인과 식 (1)의 조건이 만족될 경우 출력신호는 해당주파수대역에서 위상차가 0° 인 필터를 통해 비반전 입력에 연결되거나 또는 180° 의 위상차 필터에 대해서 반전입력(inverting input)부로 입력된다.

Barkhausen 이론에 근거하여 구동주파수를 예측하는 과정에서 MOSFET의 전도손실과 게이트 커패시턴스가 영(zero)이고 드레인(drain)에서 소스(source)로의 순간 전송 특성을 갖는 이상적인 상태라고 가정하였다. 여기서, 자려발진을 고려하고 게이트 구동전압을 안정하게 유지하기 위하여 게이트단에 이상적인 상태의 제너다이오드를 사용하는 경우를 가정하였다. 이와 같은 근사를 바탕으로 그림 2의 LC 공진부에 인가되는 전압(V_i)과 인덕터 전류(i_{Lr}) 및 램프

의 실효전압(V_{lamp})를 다음의 식 (2)~(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = -\frac{2V_{dc}}{\pi} \sin(\omega t + \Phi) \quad (2)$$

$$i_{L_r}(t) = -I_p \sin \omega t \quad (3)$$

$$V_{lamp} = \frac{\sqrt{2} V_{dc}}{\pi} \frac{1}{\sqrt{(1-f_n^2)^2 + (\frac{f_n Z_0}{R_{lamp}})^2}} \quad (4)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, f_n = \frac{f}{f_r}, f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (5)$$

여기서 V_{dc} 는 버스전압(bus voltage), ω 는 스위칭 주파수, f_n 은 공진주파수에 대한 정규화 주파수이며, R_{lamp} 는 램프 저항을 각각 의미한다. 자려발진 회로의 트랜스포머 권선비 n 을 고려하면 전류와 전압의 위상차(Φ)와 인덕터 L_r 의 피크전류(I_p) 및 피드백(feedback)전류(i_f)는 다음 식(6)~(8)과 같이 기술된다.

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{R_{lamp}}{Z_0} f_n (f_n^2 + (\frac{Z_0}{R_{lamp}})^2 - 1) \right) \quad (6)$$

$$I_p = \frac{2V_{dc}}{\pi Z_0} \sqrt{\frac{1 + (\frac{R_{lamp}}{Z_0})^2 f_n^2}{(\frac{R_{lamp}}{Z_0})^2 (1-f_n^2)^2 + f_n^2}} \quad (7)$$

$$i_f(t) = -\frac{i_{L_r}(t)}{n} = \frac{I_p}{n} \sin \omega t \quad (8)$$

인버터의 구형과 전압과 인덕터 전류간에는 위상차 θ 가 발생하고, 트랜스포머 2차측의 유도전류(i_s)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_s(t) = \frac{V_Z}{L_m} (t + \frac{\theta}{\omega} - \frac{1}{2\omega}) = \frac{V_Z}{L_m} (t - \frac{1}{\omega} (\frac{\pi}{2} - \theta)) \quad (9)$$

임의의 시간($t_1 = \frac{\pi - \Phi}{\omega}$)에서 i_s 가 i_f 에 도달할 경우, 게이트단의 전압극성이 바뀌게 된다. 결과적으로 스위치는 t_1 의 시간일 때 교대로 스위칭되고 피드백 전류와 트랜스포머의 2차측 유도전류가 일치하게 된다. 따라서 식(1)의 Barkhausen의 발진조건을 적용하면 구동주파수는 다음의 식(10)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{1}{4L_m} \frac{nV_Z}{I_p \sin \Phi} \quad (10)$$

3.2 인버터 회로

트랜스포머의 원리를 이용하여 전기적으로 해석되는 유도

결합형 방전광원을 구동하고자 할 경우, 안정기는 고주파의 동작이 가능해야 한다. 자려방식의 발진조건으로부터 구한 이상의 설계조건을 근거로 그림 2의 Class-D 형태의 하프 브리지(Half-bridge)방식의 회로를 도입하였다[17]. 공진용 인덕터 L_r 과 직렬 및 병렬 커패시터 C_d , C_r 를 사용한 LCC 직 병렬 공진 방식은 L_r , C_d 로 구성되는 직렬공진방식에 비해 제어성능의 개선과 L_r , C_r 로 구성되는 병렬공진방식에 존재하는 전류증가 문제를 해결할 수 있는 장점을 갖는다. 유도 결합형 플라즈마 광원의 경우 일반 형광 램프와는 달리 인덕턴스 L_m 을 갖는 자기 트랜스포머가 램프와 결합되어 있어 회로적으로 램프는 램프저항 R_{lamp} 와 자화인덕턴스 L_m 의 조합으로 등가화 할 수 있다. 이 경우 LCC 공진회로의 병렬 커패시터 C_r 와 광원의 결합 인덕턴스 L_m 이 병렬연결된 구조가 되어 각 요소의 리액턴스는 $\omega L_m > 1/\omega C_r$ 의 관계를 가지므로 C_r 에 대한 등가 병렬커패시턴스 C_{eq} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{eq} = C_r - \frac{1}{\omega C_r} \quad (11)$$

즉 광원과 결합된 트랜스포머의 자화 인덕턴스 L_m 은 공진회로의 병렬 커패시턴스 성분을 저하시키는 역할을 하므로 실제 구동회로를 설계하는 경우 이를 고려해야 한다.

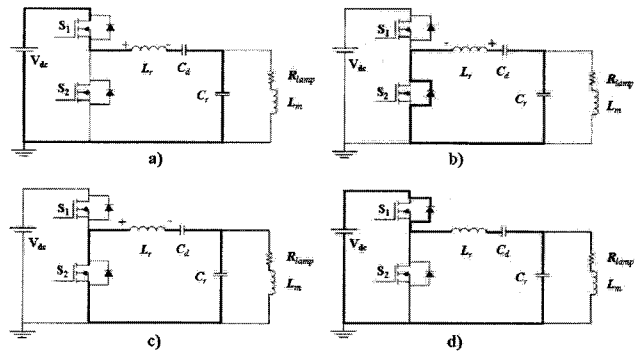


그림 3 하프브리지 방식 구동회로의 모드별 동작 순서도
Fig. 3 Discontinuous driving circuit sequences of half-bridge method

그림 3은 그림 2에 도식된 하프브리지 방식의 인버터 구조를 동작 모드(mode)별로 구분하여 나타낸 그림으로, 이 회로방식은 S_1 이 on일 때 외부입력 V_{dc} 로부터 에너지를 전달받고 S_2 동작시 LC 공진회로에 저장된 에너지로 반대의 전류루프를 형성하는 형태의 동작을 취하게 된다. 그림 3의 모드별 동작은 다음과 같다. (a)의 모드 1에서는 S_1 on, S_2 off 상태로 S_1 이 on 되는 순간 공진전류는 서서히 증가하여 S_1 이 off될 때 거의 0에 근접하며 인덕터 전류는 S_1 이 off된 후 0이 될 때까지 지속된다. (b)의 모드 2는 환류구간으로 S_1, S_2 는 off 상태이며, LCC 공진회로에 저장된 에너지는 C_d , C_r 및 S_2 와 역병렬로 연결된 환류다이오드 D_2 를 통하여 에너지가 방출된다. 그림 (c)의 모드 3은 S_1 off, S_2 on 상태가 되고 LCC 공진회로의 인덕터 L_r 부분에서는 역기

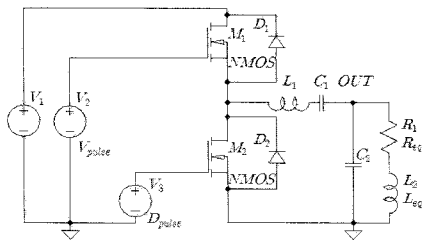
전력이 발생되기 때문에 C_d 와 C_r 를 통하여 에너지 전달이 이루어진다.

그림 (d)는 모드 4로서 S_1 과 S_2 는 off 상태이며 모드3의 과정이 진행된 후 나타나는 환류구간이다. 이때 LCC 공진회로에 의해 S_1 의 역병렬 다이오드 D_1 을 통하여 인덕터 L_r 의 저장 에너지가 C_d , C_r 로 전달된다. 이 과정 이후 다시 동작모드 1의 작동이 이루어짐으로 반복적인 고주파 스위칭 동작이 지속적으로 진행되게 된다.

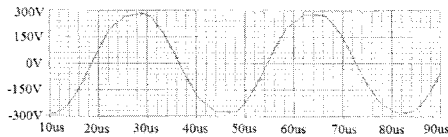
한편, 인버터 회로의 입력전원은 스위칭 소자의 동작으로 인해 구형파전원이 인가되는 형태이며 램프 점등 전과 후로 특성이 구분된다. 점등 전에는 램프의 임피던스가 매우 크기 때문에 개방회로로 가정하면 C_d 와 C_r 가 직렬로 이루어진 병렬공진회로 특성을 나타내며, 공진주파수 f_r 은 다음과 같다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r \times \left(\frac{C_d \times C_r}{C_d + C_r} \right)}} \quad (12)$$

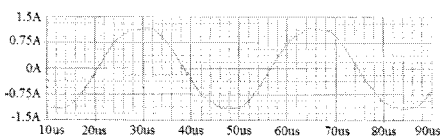
점등 후에는 램프의 임피던스가 낮아지므로 병렬 커패시터 C_r 의 영향이 줄게 되어 직렬공진회로의 특성을 가지게 되고 스위칭 주파수가 공진주파수보다 높은 영역에서 연속모드의 동작이 가능하다. 공진커패시터 C_d , C_r 및 공진인덕턴스 L_r 은 식(11), (12)를 이용하여 구할 수 있으며, 스위칭 주파수 f_s 를 250 kHz로 선정하면 C_d , C_r 및 공진 인덕턴스 L_r 은 각각 0.22 μ F, 3.3 nF 및 150 μ H 정도가 적절하다.



(a) 등가모델



(b) 전압 파형



(c) 전류 파형

그림 4 하프브리지 방식의 등가모델과 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Voltage and current graph of half-bridge method by simulation

그림 4(a)는 시뮬레이션을 위한 등가모델을 나타낸 그림이고 그림 4(b)는 직류입력 링크 전압 DC 400 V에 대해 250 kHz 부근의 주파수로 스위칭할 때 출력되는 전압 파형을 나타낸 것이며 (c)는 이때의 출력 전류파형을 나타낸 것이다. 회로 설계에 대한 시뮬레이션 결과로부터 250 kHz로 스위칭할 경우 점등 후 램프의 피크전압 V_p 는 약 300 V, 램프의 피크전류 I_p 는 약 1.15 A 정도이며, 램프의 전압과 전류간에는 약 20° 정도의 위상차가 발생하였다. 이와 같은 시뮬레이션 결과는 250 kHz 대역에서 광원의 구동과 점등을 위한 안정적인 전력공급이 가능함을 나타내고 있다. 또한 전기적으로 효율을 향상하기 위해서는 정합성이 고려되어야 하며, 이러한 판단은 식 (10)과 유도결합형 플라즈마 광원의 구동 시에 측정이 가능한 물리량들을 측정함으로써 안정기의 설계 조건에 대한 정합성 판단이 가능하다. 즉 자력발전 방식의 인버터로 광원을 구동시키고 이때 출력되는 안정기의 전압, 전류, 위상차 θ 및 피크 전류 I_p 를 측정함으로써 구동주파수와 자화인덕턴스 L_m 의 변화를 예측할 수 있다.

3.3. 광원 설계 요소의 고려

유도결합형 플라즈마 광원의 구성은 그림 1과 같이 유도코일 부분과 방전관 부분으로 구분할 수 있다.

유도코일 부분은 페라이트 코어와 코일로 구성되어 있으며, 이러한 유도결합형 플라즈마 광원을 전기적으로 해석하고자 할 때 트랜스포머 원리를 이용한다. 이때 유도 코일의 페라이트 재질과 페라이트에 감긴 코일의 턴수(n)는 유도결합형 플라즈마 광원의 자화 인덕턴스와 관련된 파라미터로서 구동회로 설계와 특성의 이해에 중요한 부분이다. 일반적으로 100 kHz 대역의 구동 주파수를 갖는 유도결합형 플라즈마 광원의 경우 효율적인 기체방전을 유도하기 어려우며, 300 kHz 이상의 영역에서는 코어손실의 급속한 증가현상을 나타내고 있다.

본 연구에서는 인버터의 구동 주파수, 페라이트의 재질에 따른 투자율, 코어손실 및 자계강도 등을 고려하여 상대 투자율 1,500 그리고 자화 인덕턴스 500 μ H 정도를 갖는 Mn-Zn계 페라이트를 적용하였다. 적용된 페라이트 코어는 2개의 반원 형상을 결합하여 링의 형상을 갖도록 한 구조로서 페라이트 코어의 내부에 방전관이 통과하는 특징을 갖는다.

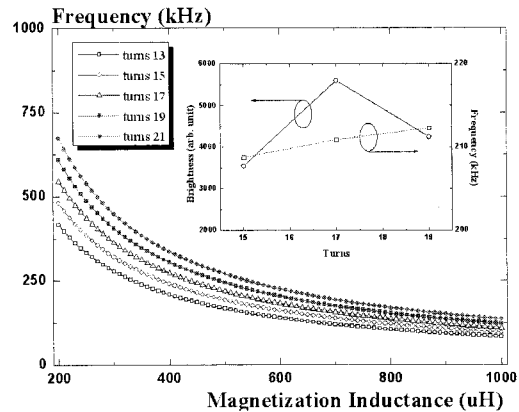


그림 5 코일의 권선비에 따른 $L_m - f$ 그래프($I_p=1.0$ A)
Fig. 5 $L_m - f$ graph depending on turns of a coil

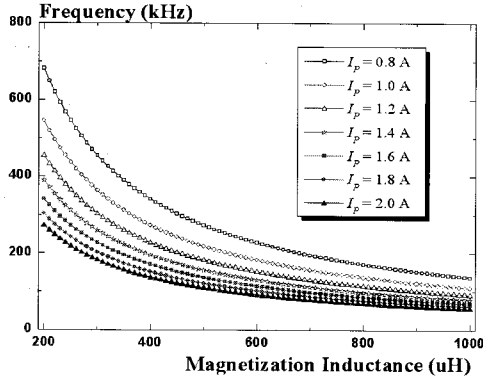


그림 6 안정기 출력 전류변화에 따른 $L_m - f$ 그래프($n=17$)
 Fig. 6 $L_m - f$ graph depending on output current of ballast

그림 5는 식 (10)를 이용하여 임의의 설정된 조건에서 자화인덕턴스와 구동주파수간의 관계를 계산한 결과이다. 이때 V_Z 는 9.1 V, 위상차(ϕ)는 약 20° 를 대입하였다. L_m 이 500 uH인 페라이트 코어를 사용한 시료 광원의 경우 269.3 kHz($n=21$ 일 때)에서부터 166.7 kHz($n=13$ 일 때)까지 선형적으로 변화함을 확인할 수 있다. 그러나 이미 언급하였듯이 100 kHz대역과 300 kHz대역을 사용할 경우 효율적인 방전을 이루기 어렵다는 점과 함께 페라이트 코어의 손실이 커지게 된다는 문제점을 고려해 볼 때 그림 4의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 200 kHz대역에서 구동할 필요가 있음을 확인하고서 l 이 705 mm인 시료 광원을 사용하여 13턴부터 21까지 바꾸어가면서 휘도를 측정하였다. 이때 그림 4의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 250 kHz 대역의 구동주파수를 갖는 안정기를 사용하여 구동하였다. 그림 5의 삽입도는 l 이 705 mm인 시료 광원에 대해 권선수의 변화에 따른 유도 결합형 플라즈마 시료 광원의 휘도 특성을 측정된 결과이다. 먼저 n 이 13, 21인 경우 시료광원에서 안정적인 방전을 이루지 못하여 해당 결과는 얻지 못하였다. 결과를 통해 볼 때 n 이 17턴의 경우 가장 높은 휘도 특성을 확인할 수 있다. 반면 n 이 15턴 혹은 19턴인 경우에는 휘도 저하가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 5의 결과와 비교해 본다면 17턴인 경우 218 kHz의 구동주파수가 요구될 때 210.9 kHz의 구동주파수로 거의 유사한 주파수 대역에서 구동됨을 확인할 수 있다. 반면 243.7 kHz의 구동주파수가 요구되는 19턴의 경우는 212.3 kHz로, 192.4 kHz가 요구되는 15턴의 경우는 208.8 kHz로 구동되고 있음을 볼 수 있다. 이는 자화인덕턴스와 공진 회로부의 캐패시터간에 발생하는 상호작용에 의한 공진모드가 250 kHz 주파수 대역에서 이동하였기에 기인된 결과라 판단된다. 따라서 그림 5의 계산 결과와 비교해 볼 때 자화 인덕턴스가 15턴은 460 uH, 17턴은 500 uH, 570 uH까지 변화함을 확인할 수 있다. 결과적으로 17턴의 권선수를 채택한 시료 광원에서는 자화 인덕턴스의 변화가 거의 없다는 사실을 알 수 있으며 초기에 설계된 250 kHz의 구동주파수에 대해서는 공진모드 형성이 210 kHz 영역에서 발생되어 안정적인 발진과 방전이 형성됨을 알 수 있다.

그림 6은 피크전류 변화에 따른 자화 인덕턴스와 구동주파수간의 관계를 식 (10)을 통해 얻은 결과값으로서 이때의 권선수는 17턴을 채택하였다. 피크 전류의 변화에 대해 구동

주파수는 비선형적으로 변화함을 볼 수 있는 반면, 설계된 자화 인덕턴스값이 210 kHz 대역에서 잘 유지되기 위한 피크 전류값을 확인할 필요가 있다. 그림 6의 결과를 볼 때 500 uH대역에서 1.0 A는 218 kHz, 1.2 A는 181.7 kHz 정도를 나타내고 있다. 따라서 피크 전류값은 1.0~1.1 A의 정도에서 형성될 때 자화 인덕턴스의 변화를 최소화할 수 있고 이러한 사실은 주울열을 최소화 할 수 있는 조건이라 판단된다.

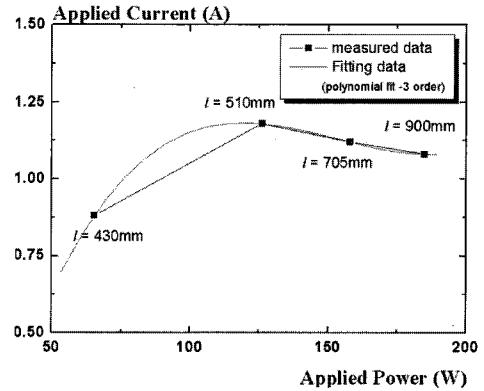


그림 7 발광관 길이에 따른 전력-전류 그래프
 Fig. 7 $P - I$ graph depending on a length of a discharge tube

그림 7은 각기 다른 종방향 길이(l , $i=1,2,3,4$)를 갖는 시료 광원에 대해 안정화 이후 안정기의 출력 전력에 대한 피크 전류를 측정결과이다. 이때 권선수는 17턴, 구동주파수는 250 kHz를 갖는 안정기에 의해서 구동되었다.

l_1 이 430 mm인 경우 피크전류는 0.88 A (65.4 W, 74.32 V), l_2 이 510 mm인 경우 1.18 A (126 W, 106.78 V), l_3 가 705 mm인 경우 1.13 A (158 W, 141.07 V) 그리고 l_4 가 900 mm인 경우 1.08 A (185 W, 171.30 V)를 나타내고 있다. 75 W급에 해당되는 l_1 의 경우는 상대적으로 낮은 전류와 전력의 인가가 이루어지는 것으로 측정되었다. 이에 대한 분석으로는 가스방전이 전기에너지의 세기에 비례하지 않고 전기·광학적 쿼칭(optical quenching) 등에서 기인되는 열적 손실에 의해서 상대적으로 열등한 전기적 특성이 측정된 것으로 판단된다. 이에 반해, 100~200 W급 이하의 영역에서는 주울열 발생이 낮은 지역으로서 l 성분이 전기적 저항성분에 비례하는 것과 같이 나타나고 있다. 이러한 사실적 근거는 l_4 의 경우 1.08 A, l_3 는 1.12 A, l_2 는 1.18 A를 나타내고 있는 결과를 통해 판단할 수 있다. 즉, 그림 5로부터 1.0~1.1 A 대역에서는 자화 인덕턴스가 500 uH대를 유지할 수 있다는 사실을 토대로 볼 때, $l_2 \sim l_4$ 까지 변화되면서 자화 인덕턴스의 초기 설계된 값이 잘 유지된 것으로서 이러한 영향은 주울열의 발생이 낮은 것에 의해 기인된 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 Barkhausen의 안정기 발진 이론을 통해서 유도된 발진 조건식에 관계하는 안정기 설계 인자 사이의 상

호의존성을 확인하였다. 또한 발진 조건식의 계산값을 통해 적합한 권선수를 갖는 시료 광원을 제작하였고 측정된 시료 광원의 휘도 특성결과를 통해 초기에 설계된 구동주파수의 변화는 나타나지만 자화 인덕턴스의 변화가 작은 조건을 도출하였다. 도출된 조건으로는 피크 전류의 값이 1.0~1.1 A 대역에서 구동이 가능하여야 하는 것으로 판단된다. 조건에 부합되는 피크 전류를 갖기 위해서는 방전관의 길이가 중요한 설계인자로서 판단되었으며 본 연구에서는 705 mm의 길이를 갖는 유도결합형 플라즈마 광원에 158 W(I_3)를 인가할 경우 다른 시료 광원에 비해 가장 안정적인 자화인덕턴스와 구동주파수의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

결과적으로 자화 인덕턴스의 값에 대한 유지 능력의 개선은 방전관의 길이와 권선 및 구동주파수가 주요 설계인자임을 Barkhausen의 발진이론을 통해 확인하였다. 그리고 이러한 설계인자들 간의 상호 의존성이 적합한 피크 전류값의 영역을 만족할 경우 안정적인 안정기의 발진과 함께 광원 구동시 발생하는 주출열에 의한 페라이트 코어의 특성변화를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 더불어 향후 구동주파수의 변화가 최소화되는 공진 모드를 형성할 경우 신뢰성이 높은 안정기의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Miroslav sedlaček, "Electron Physics of Vacuum and Gaseous Devices", JOHN WILEY & SONS, INC., pp386-408, 1996.
 [2] Brian Chapman, "Glow Discharge Processes-sputtering and plasma etching," JOHN WILEY & SONS, INC., pp.65-72, 1980.
 [3] R. O. Dendy, "Plasma Dynamics," CLARENDON PRESS · OXFORD, pp 8-18, 1990.
 [4] Herbert B. Callen, "Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics", Second Edition, John Wiley & Sons Inc., pp 289-306, 1987.
 [5] Federick Reif, "Fundamentals of Statistical and Thermal Physics", International Edition, MacGRAW-HILL, pp 239-247, 1987.
 [6] J. R. Coaton and A. M. Marsden, "Lamps and Lighting", Fourth Edition, ANRNOLD, pp 1-336, 1997.
 [7] James T. Dakin, James A. Leonard, Stuart A. Mucklejohn and Gergely Ormandlaky, "Ceramic Metal Halide Lamp", US Patent, No. 6,731,068,B2, 2004.
 [8] Michio Takagaki, Takeshi Fukuyo, Shinchi Irisawa, "Mercury-Free Arc Tube for a Discharge", US Patent, No. 7,170,230,B2, 2007.
 [9] Walter P. Lalatovich, Sharon L. Ernest, Susan L. Callahan, Robert J. Karlotski and Janice T. Karlotski, "Mercury Free Discharge Lamp with Zinc Iodine", US Patent, No. 6,853,140,B2, 2005.
 [10] G. M. J. F. Luijks, S. Nijdam and H. V. Esveld, "Electrode diagnostics and modelling for ceramic metal halide lamps", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 38, pp 3163-3169, 1997.
 [11] Baldur Eliasson and Ulrich Kogelschatz, "Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, pp

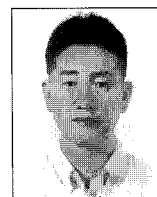
1063-1077, 1991.
 [12] Ulrich Kogelschatz, Baldur Eliasson and Walter Egli, "From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges", Pure Appl/ Chem., Vol. 71, pp 1819-1828, 1999.
 [13] U. Kogelschatz, H. Esrom, J.-Y. Zhang, I. W. Boyd, "High-intensity sources of incoherent UV and VUV excimer radiation for low-temperature materials processing", Appl. Surf. Sci., Vol. 168, pp 29-36, 2000.
 [14] Robert, E., Sarroukh, H., Cachoncinlle, C., Viladrosa, R., Hochet, V., Ed daoui, S., Pouvesle, J. M., "Spectroscopic and electrical study of rare-g as-based, hollow cathode luminescent discharges: Application to the life time and efficiency enhancement of mercury-free signs", Pure and applied chemistry. : Chimie pure et appliquee, Vol. 77, No. 2, pp. 463~474, 2005
 [15] Harold Chestnut and Robert W. Mayer, "Servomechanism and Regulating System Design", Wiley, New York, 1955.
 [16] Alysson Raniera Seidel, Fabio Ecke Bisogno, Humberto Pinheiro and Ricardo Nederson do Prado, "Self-Oscillating Dimmable Electronic Ballast", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 50, pp 1267-1274, 2003.
 [17] Ricardo N. do Prado, Saul A. Bonaldo Diego S. Greff, Fábio E. Bisogno, "A Unity Power Factor Electronic Ballast for Fluorescent Lighting", IEEE Industry Application Society, Annual Meeting, pp 2366-2371, October 1997.

저 자 소 개



김철진 (金澈珍)

1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업
 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박)
 1991-1995년 생산기술연구원, KETI 제어
 기기 연구실장, 1995-현재, 한라대학교 전
 기전자제어 공학부 교수, 당학회 평의원
 Tel : 033) 760-1245
 E-mail : cjkim@halla.ac.kr



임연찬 (林涓贊)

1998년 원광대학교 물리학과 졸업. 2002
 년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 2006
 년 광운대학교 전자물리학과 졸업(이학
 박사). 2007.원광대학교 전자재료공학과
 Post BK21 박사후 과정. 현 생산기술연
 구원 박사후 과정
 E-mail : yimychan@kitech.re.kr